

SIMULACIÓN DE FENÓMENOS DE CONVECCIÓN NATURAL EN RECINTOS CERRADOS

S. Obregón, V. Molina, N. Salvo

INENCO - Universidad Nacional de Salta
 Buenos Aires 177 – (4400) – Salta – Argentina
 Tel: 54-387-4255489

E-mail: obregon@inenco.net molinav@inenco.net nahuel@unsa.edu.ar

RESUMEN: En un proceso de transferencia de energía entre un sólido y un fluido se destaca principalmente el fenómeno de convección natural como motor de dicho fenómeno y modelarlo numéricamente resulta muchas veces muy complicado dependiendo principalmente de la geometría y del esquema numérico utilizado. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de simulaciones realizadas de sistemas donde la convección natural es el principal mecanismo de transferencia de energía. Se estudian geometrías sencillas y se aplica el resultado a superficies extendidas (aletas). Se muestran los valores de temperaturas y vectores velocidad para los casos estudiados.

Palabras Claves: *simulación, convección*

INTRODUCCIÓN

En la vida diaria el fenómeno de transferencia de energía está siempre presente. En este sentido se pueden mencionar en general a todas las aplicaciones que utilizan el aprovechamiento de radiación solar, a los efectos contraproducentes que provoca el aumento de temperatura en muchos equipos electrónicos, al movimiento del aire que en forma natural calefacta un ambiente etc. Por lo amplio del espectro de situaciones involucradas se concluye inmediatamente que el estudio y comprensión de este tipo de fenómeno es muy importante. Actualmente existen muchos trabajos relacionados con el tema tanto en forma teórica como experimental, pero la simulación numérica es nueva en el sentido que se ha transformado en una herramienta práctica a la hora de diseñar un determinado sistema o ampliar diseños experimentales a otros rangos o situaciones.

Por lo anterior la convección natural es uno de los fenómenos más estudiados y si nos concentramos en la mayoría de los sistemas que aprovechan la energía solar, por ejemplo, la convección está siempre presente, tal es el caso de colectores planos o muros Trombe por nombrar algunas aplicaciones. Por todo esto tener una herramienta de cálculo y visualización de este fenómeno conformaría un aporte importante para el diseñador.

La visualización experimental es la base para comprobar modelos teóricos dentro de ciertos rangos impuestos por el diseño propiamente dicho, pero la simulación numérica constituye actualmente una herramienta fundamental de diseño para cualquier sistema porque permite ampliar los límites impuestos por la experimentación.

Utilizar técnicas experimentales al caso de transferencia de energía por convección natural por lo general está sujeto a modelos de geometrías sencillas, con el objeto de poder visualizar y predecir posibles resultados donde el fenómeno de convección natural este presente. Por otro lado aplicar toda la potencia de los métodos numéricos para comprender las características de la convección natural, así como los parámetros que la rigen, puede ser de gran utilidad para la resolución de posteriores problemas que lo precisen.

MODELO COMPUTACIONAL

Los problemas de dinámica de fluidos acoplados con efectos de transferencia de calor requieren la solución simultánea de un sistema de ecuaciones no lineales. Estas ecuaciones deben ser resueltas en el tiempo (problemas no estacionarios) y el espacio, obteniéndose como resultado para una determinada variable (por ejemplo la velocidad) distribuciones de la forma $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x,y,z,t)$. Además si se considera que el fenómeno es caótico la distribución de velocidad anterior contendrá componentes aleatorias de la velocidad en cada dirección del espacio. Una forma de resolver este sistema de ecuaciones es emplear el Método de los Elementos Finitos (MEF). El sistema de ecuaciones se resuelve discretizando el dominio que se desea modelar y sobre cada elemento de esta discretización se resuelve el sistema de ecuaciones, (Molina et al. 2003). La malla utilizada al igual que el post proceso fue generada utilizando

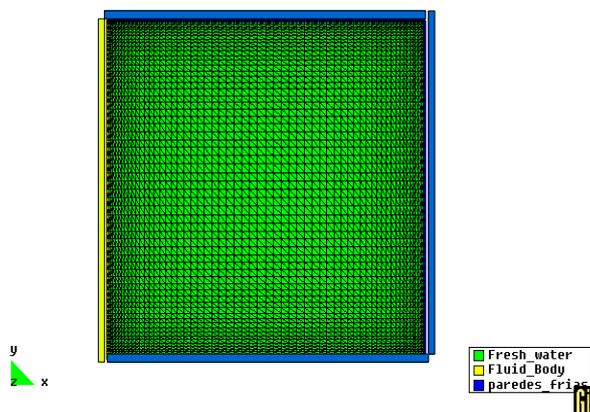


Figura 1: Dominio modelado (malla y elementos)

GiD que es un soft desarrollado por el CIMNE (International Center for numerical Methods in Engineering)

Con el objeto de implementar esta técnica a problemas donde la convección natural esta presente y poder comparar resultados se consideró el dominio de la figura 1. Este representa una aproximación en 2D del diseño experimental presentado en reuniones de ASADES anteriores (Vilte et al.2000). A este dominio se lo calienta en un costado, con aporte de energía constante.

El sistema esta lleno de un fluido (agua) en condiciones estáticas. Con respecto a las temperaturas iniciales del sistema las mismas se suponen constantes y con un valor de $T_{agua} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para el resto de las paredes del cubo (en 2D) se supone una pérdida de energía constante. De esta manera el líquido que está en contacto con la pared caliente aumenta su temperatura y cambia su densidad generando un flujo ascendente.

En la figura 1 se aprecia también la malla de elementos finitos y las condiciones de contorno (tipo Newman) impuestas. La malla consta de 7200 elementos triangulares (3 nodos) teniendo un número total de nodos de 3721. La característica principal de esta malla es que se concentraron elementos hacia los costados del cubo, la razón de esto es obtener una mejor precisión en el tratamiento numérico.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados que se presentan a continuación responden a un determinado modelo computacional. En este modelo está incluido no solo las condiciones de contorno sino también las ecuaciones que describen el flujo que se genera por cambio de densidad por efecto de la variación de temperatura. El fenómeno de convección natural puede ser visto inicialmente como un fenómeno de flujo laminar. Pero según las conclusiones del ensayo experimental citado, este tipo de fenómeno no alcanza un equilibrio dinámico aunque el sistema se encuentre en equilibrio térmico. Esto significa considerar al fenómeno como turbulento. Modelar un flujo turbulento implica solucionar el siguiente sistema de ecuaciones:

Descripción	Ecuación
Ecuación de continuidad	$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ \mathbf{u} = velocidad
Ecuación de Navier Stokes	$\rho[\partial_t \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + 2\omega \times \mathbf{u}] - 2\nabla \cdot [\tau_R + \mu \varepsilon(\mathbf{u})] + \nabla p + \sigma \mathbf{u} + \rho \beta \mathbf{g} \vartheta = \rho \mathbf{f}$ \mathbf{f} =fuerzas de volumen $\mathbf{f} = \mathbf{g} + \mathbf{g} \beta \vartheta_0$; τ_R tensor de Reynolds; ω vorticidad $\nu = \mu/\rho$; ϑ temperatura
Suposición Boussinesq	$\tau_R = \mu_t \varepsilon(\mathbf{u})$ μ_t viscosidad de remolino
Ecuación de Calor	$\rho C_p [\partial_t \vartheta + \mathbf{u} \cdot \nabla \vartheta] - \nabla \cdot (\kappa \nabla \vartheta) = S$ S fuentes o sumideros
Modelo Smagorinski: $\nu_t = c h^2 \sqrt{2 \varepsilon(\mathbf{u}) : \varepsilon(\mathbf{u})}$ c constante experimental = 0,01 h tamaño del elemento finito	

De los diferentes ensayos realizados se concluyó que la implementación del modelo de Smagorinsky en las ecuaciones generales ajustaba mejor a los datos experimentales. Por otra parte este modelo implementa en su formulación el tamaño de la discretización utilizada, (ver tabla) lo que es importante sobre todo si se observa la alta discretización en la zona de interés (costado caliente del cubo). Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en forma gráfica en diferentes figuras. La simulación se realizó considerando un tiempo real de 3600 segundos.

En la figura 2 se aprecian los vectores velocidad del flujo, mostrando el avance de una corriente ascendente producto de la energía suministrada por la pared izquierda segundos después de iniciado el calentamiento. La simulación predice una corriente ascendente que choca con la parte superior del recinto generando una corriente de izquierda a derecha. La figura 3 corresponde a instantes posteriores donde hay una nueva interacción con la pared derecha que genera un leve retroceso y desplazamiento de vórtices generados por el fenómeno. Para todas las figuras $t_0 = 5$ segundos y $\Delta t = 10$ segundos

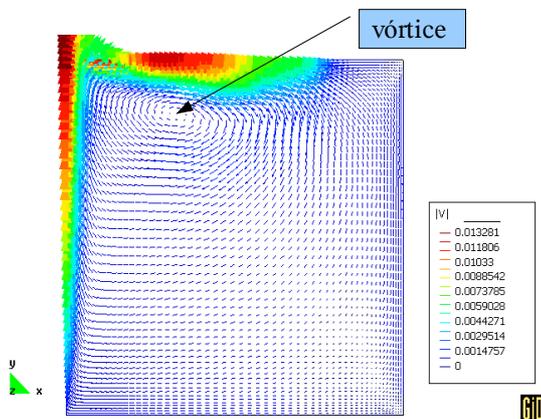


Figura 2: Campo de velocidad ($t = t_0$)

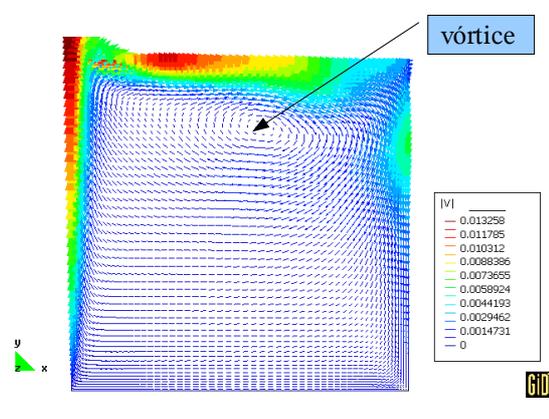


Figura 3: Campo velocidad $t = t_0 + \Delta t$

Las figuras 4 y 5 corresponden a instantes posteriores como se indica en cada una de ellas. En las mismas puede visualizarse correctamente cual es la situación de los vórtices convectivos. Además por efecto del borde de la derecha los mismos se mueven en sentido contrario a la corriente en la parte superior. En todas las figuras pueden apreciarse los valores del modulo de la velocidad. Debido a lo que sucede en la parte superior se generan inestabilidades en la parte inferior del dominio.

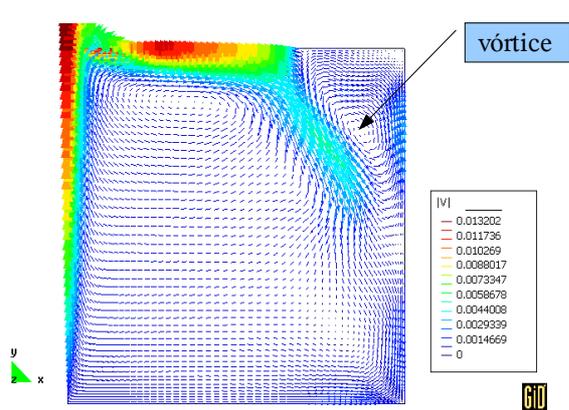


Figura 4: Campo velocidad ($t = t_0 + 2 \Delta t$)

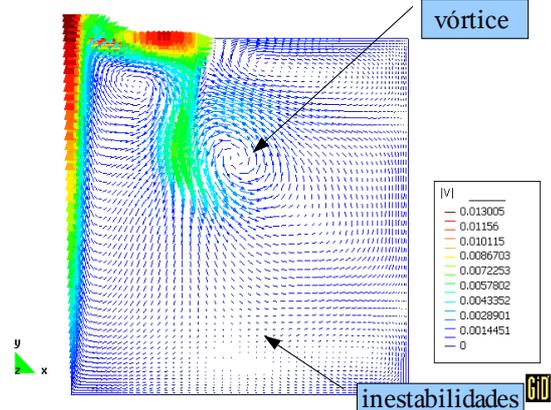


Figura 5: Campo de velocidad ($t = t_0 + 4 \Delta t$)

La figura 6 que corresponde a instantes muy posteriores de la simulación como se indica en ella misma. muestra un patrón de recirculación en forma diagonal al cubo. Además en la parte inferior hay también una recirculación. Este patrón se mantiene para todo el tiempo restante pero se estabiliza el vórtice inferior en el sentido que tiende a desaparecer (figura 7). Las flechas más gruesas denotan la circulación global del fluido.

En la figura 8 se muestra la posición de tres puntos de interés y en gráficas 1 y 2 la velocidades de estos puntos.

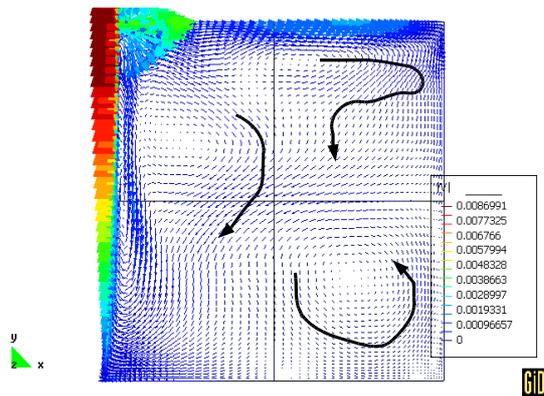


Figura 6: Campo velocidad ($t = t_0 + 130 \Delta t$)

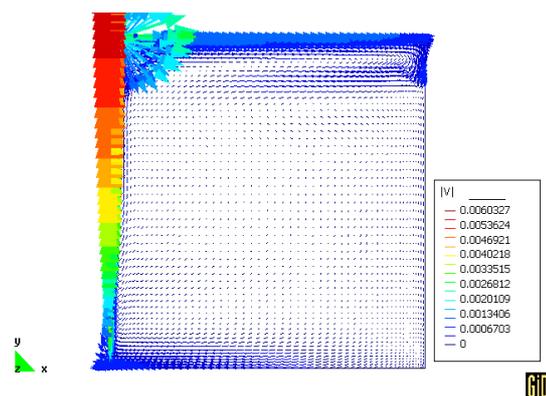


Figura 7: Campo de velocidad ($t = t_0 + 300 \Delta t$)

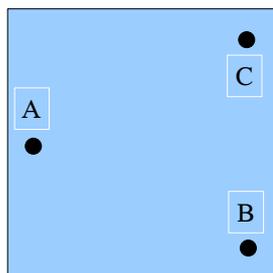
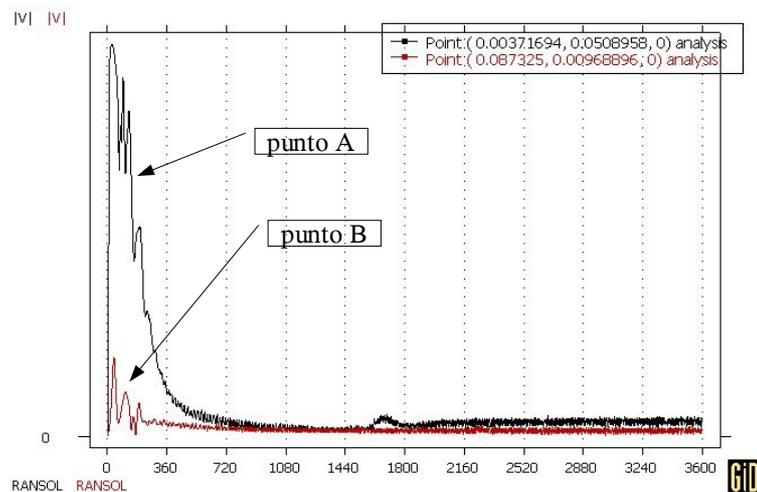


Figura 8: puntos del dominio

A partir de la gráfica 1 puede observarse que la variación de la velocidad es muy pronunciada al inicio de la simulación, luego a medida que transcurre el tiempo los valores se estabilizan. Como valor máximo para la velocidad del punto A se obtuvo 0,004 m/s, lo que indica que el fenómeno transcurre muy lentamente.



gráfica 1: Variación de la velocidad en función del tiempo con sus coordenadas

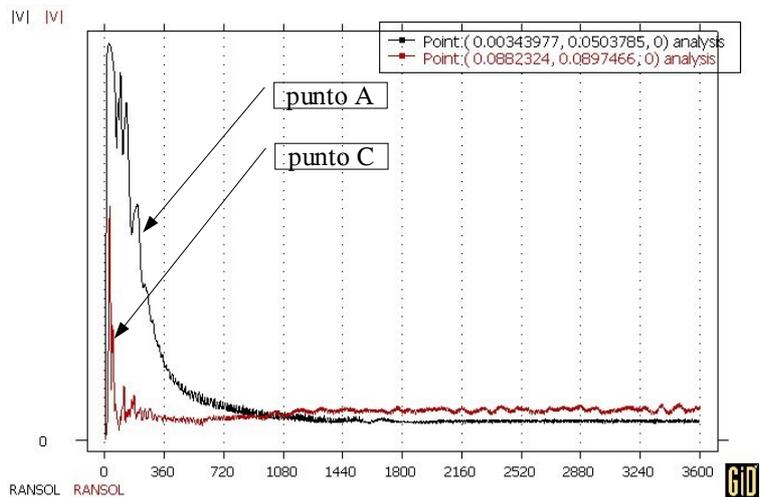
El punto B presenta al inicio una pequeña variación de la velocidad y luego se estabiliza rápidamente. La velocidad de A siempre es mayor.

En la gráfica 2 se compara el punto A con C que esta en la parte superior del dominio. Esta zona presenta una mayor variabilidad de la velocidad en los instantes iniciales. La simulación predice que cuando el fenómeno se estabiliza la velocidad del punto C siempre es mayor que la de A. Esto puede explicarse a partir de que alrededor de A hay corrientes ascendentes y descendentes.

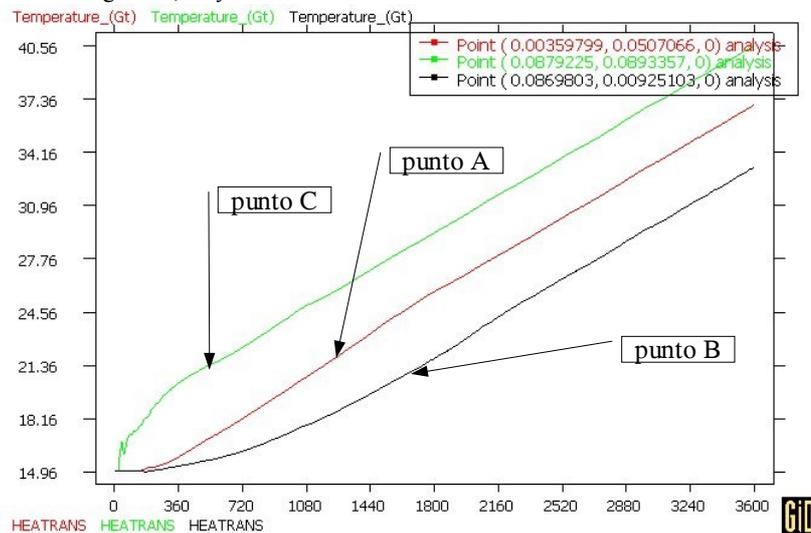
En la gráfica 3 se muestra la evolución de la temperatura para los mismos puntos.

A partir del análisis de esta gráfica queda claro como es la variación de la temperatura dentro de la zona de estudio.

Estos valores aumentan a medida que avanza la simulación (transcurre el tiempo) no llegándose a estabilizar. Esto puede apreciarse correctamente en las figuras 9, 10 y 11.



gráfica 2: Variación de la velocidad en función del tiempo



Gráfica 3: Variación de la temperatura

Las figuras 9 y 10 muestran la distribución de temperaturas que da como resultado la simulación para los tiempos que se especifican.

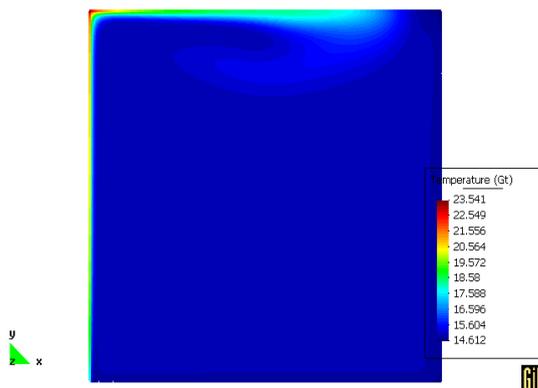


Figura 9: Distribución de Temperatura ($t = t_0$)

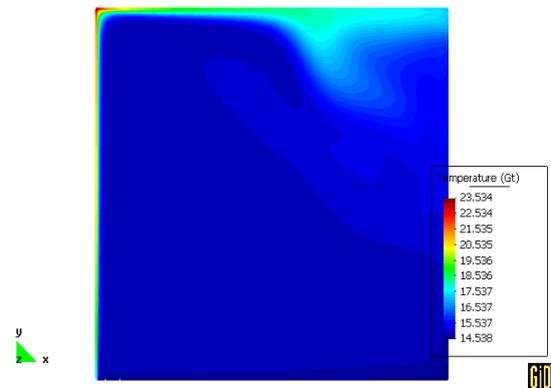


Figura 10: Distribución de Temperatura ($t = t_0 + 2 \Delta t$)

Se observa que el fluido caliente se desplaza en la parte superior del recinto provocando que en el interior del mismo ocurra un intercambio de energía haciendo que la temperatura de todo el recinto se incremente paulatinamente como se puede apreciarse en la figura 11.

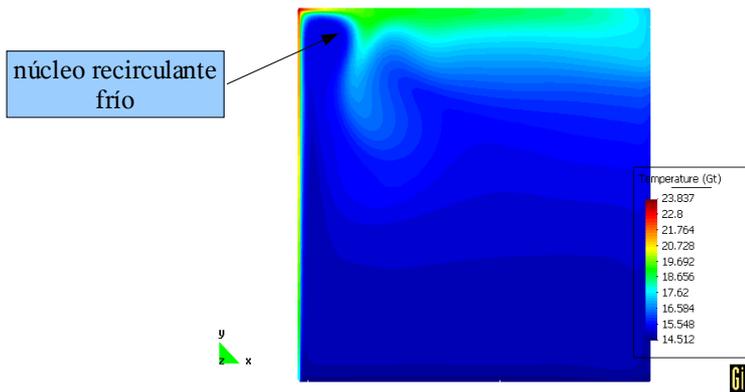


Figura 11: Distribución de Temperatura ($t = t_0 + 4 \Delta t$)

Como se ve en las diferentes figuras un flujo a mayor temperatura se desplaza pegado al techo impulsado por la corriente ascendente de la pared izquierda, debido a la aparición del núcleo de recirculación en la parte inferior ya descrito anteriormente. A través de estas figuras se puede visualizar una estela de fluido con diferentes temperaturas producto de la mezcla, otra característica importante que se observa es el aumento de la temperatura en la esquina superior izquierda debido al flujo convectivo.

En la figura 10, luego del choque del fluido contra la pared derecha se observa como una columna de líquido de mayor temperatura que el resto desciende alejándose de la pared derecha provocando un aumento de la temperatura del fluido en esa zona. También se ve claramente que una corriente paralela al techo no desaparece sino se mantiene durante un tiempo prolongado transformándose luego en estacionaria. La figura 11 muestra con claridad el retroceso de la corriente principal llegando hasta cercanías de la pared izquierda generando un flujo recirculante frío en la esquina superior izquierda durante unos breves instantes de tiempo y otro núcleo de recirculación en el costado derecho de la columna provocado por el flujo continuo pegado al techo en un todo de acuerdo a lo expresado por los autores citados (trabajo experimental)

Otra aplicación interesante en el estudio de la convección natural es la de las superficies extendidas o aletas, útiles para el aumento de la superficie en contacto con el fluido de modo que se aumente la transferencia de calor por convección. Para ello se realizó un tratamiento bidimensional y tridimensional donde se observó resultados muy razonables entre ambos tratamientos del problema

El dominio de estudio en este caso tiene las siguientes dimensiones: 0,4 m de base por 0,6 m de altura con una profundidad de 0,35 m. Los resultados que se muestran a continuación corresponden a un plano que está a 0,02 m de la base de la aleta.

En la figura 12 se observa el arranque de la convección natural provocado por el calentamiento del fluido alrededor de la aleta

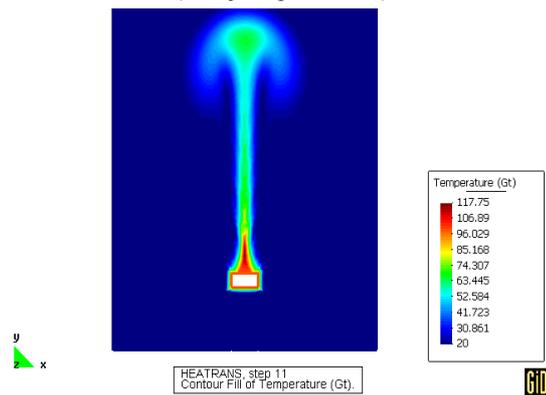


Figura 12. corriente ascendente inicial. 2D.

La columna de fluido a mayor temperatura asciende abruptamente en los primeros instantes de la simulación.

Por un corto lapso de tiempo esta columna se mantiene vertical y en constante aumento de su velocidad, luego se observa que la columna pasa de un estado estacionario a uno oscilante turbulento, producto de ese traspaso se observa un movimiento oscilatorio de la misma la cual se desplaza de lado a lado y luego de un tiempo se detectan vórtices de recirculación en la parte superior de la columna.

Estos fenómenos se pueden observar en la figura 13 extraída de la simulación en 2D. Para las figuras 14, 15 y 16 se muestran los mismos resultados pero realizando una simulación en 3D. A través de todas puede observarse la variación de temperatura en el recinto.

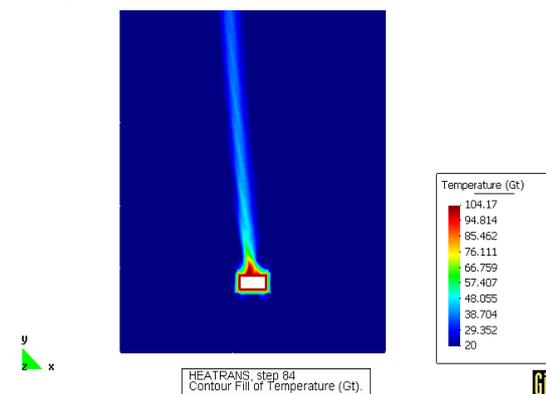


Figura 13 movimiento oscilatorio de la columna

En la imagen 17 se tiene la distribución de temperatura a lo largo de la aleta para un tiempo intermedio de la simulación.

Queda claro a partir de esta figura que la aleta tiene una distribución de temperatura, prediciendo el programa que la punta se encuentra aún fría aunque el fluido que se encuentra en la base de la misma se está calentando. Todas estas imágenes están tomadas en un plano del fluido tridimensional a 0,02 m de la base de la aleta donde se genera la corriente ascendente sobre la superficie superior de la estructura.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados en la primera parte del trabajo, se puede concluir que la simulación realizada predice

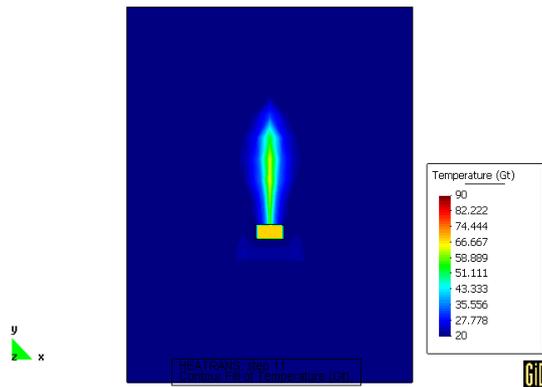


Figura 14: Temperatura al inicio de la simulación

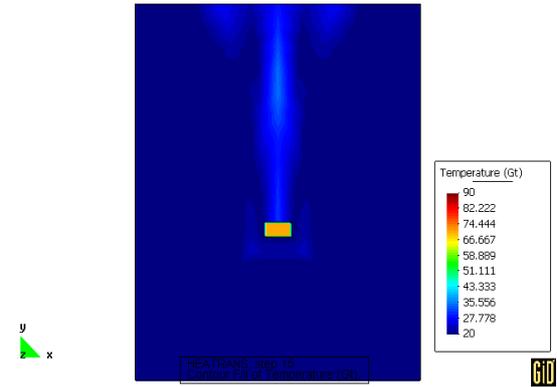


Figura 15: Temperatura promediando la simulación

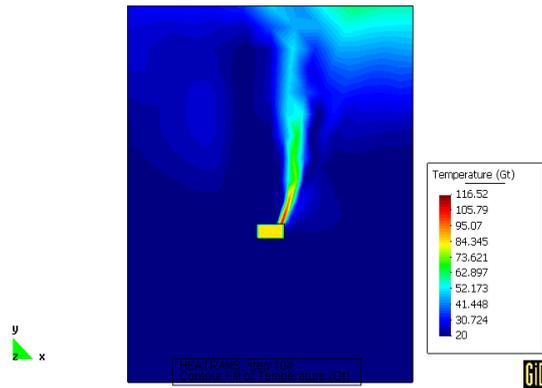


Figura 16: Temperatura instantes finales

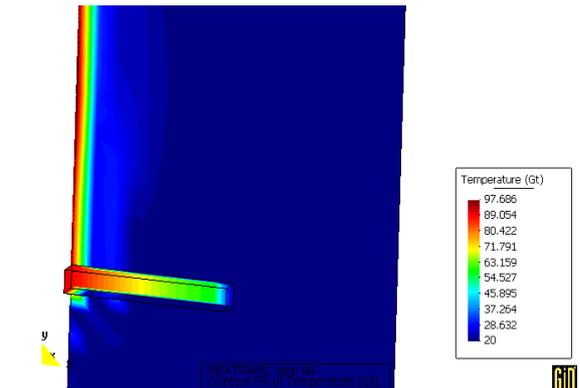


Figura 17: Temperatura sobre la aleta

correctamente el fenómeno de convección natural. La comparación de estos resultados con los datos obtenidos del trabajo oportunamente citado muestra concordancia en el rango de estudio. Esto significa entre otras cosas que se puede utilizar este programa de simulación para diseñar otras experiencias.

Según los autores (M. Vilte et al.) determinan que las características de la experiencia hace que el comportamiento del fluido dentro del cubo son bastante inestables. Esto puede observarse claramente en las variaciones de velocidad mostradas para los tres puntos característicos. Según lo obtenido como resultado de simular este fenómeno, también se concluye que la temperatura no se estabiliza para una simulación del tiempo real de una hora. Si nos referimos al comportamiento muy aleatorio del fluido en la parte superior del dominio los autores lo resaltan en su trabajo y coincide con lo obtenido por la simulación numérica.

Por otro lado el estudio de superficies extendidas puede ser llevado a cabo correctamente con este tipo de simulación y la característica de inestabilidad del flujo convectivo puede detectarse a partir de las figuras 12 y 13 en un todo de acuerdo con lo realizado con los valores experimentales para el caso del cubo. El caso de aletas es un tema a desarrollar en posteriores trabajos, sobre todo cuando se pretenda trabajar con un grupo de ellas. En este tipo de situación faltaría solamente validar experimentalmente el modelo propuesto. Para los casos estudiados hay concordancia con la bibliografía consultada.

REFERENCIAS

V. Molina, N. Salvo (2003) "Simulación en 2D del efecto del viento sobre una vivienda utilizando diferentes modelos de viscosidad" AVERMA Vol 7 Nro 2 pp 8.127-132

M. Vilte, I. De Paul (2000) "Transferencia térmica por convección natural en un recinto cerrado en condiciones de equilibrio térmico y dinámico" AVERMA Vol 4 – Nro 1 pp 02.87-100

R. Frederick, D. Carrasco "Simulación numérica en un espacio cubico a alto numero de Rayleigh" Departamento de ingeniería mecánica. Universidad Nacional de Chile.

F. Incropera, D De Witt. (1999) "Fundamentos de transferencia de calor" P. Hall ISBN 970-17-0170-4

ABSTRACT: In a process of transference of energy between a solid and a fluid the phenomenon of natural convection like motor of this phenomenon stands out mainly. To model this phenomenon numerically is often very complicated depending mainly on geometry and the used numerical scheme. In this work the obtained results of made simulations of systems appear where the natural convection is the main mechanism of energy transference. Simple geometries study and the result is applied to extended surfaces (fins). Are to the temperatures values of and vector speed for the studied cases.